

軟弱粘性土地盤の圧密沈下に伴う シールドトンネルの長期変形挙動と土圧

焼田 真司¹・津野 究²・高橋 博樹³・小宮 一仁⁴・赤木 寛一⁵

¹正会員 財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: yakita@rtri.or.jp

²正会員 工博 財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³学生会員 工修 千葉工業大学 工学研究科 博士後期課程
(〒275-8588 千葉県習志野市津田沼2-17-1)

⁴正会員 工博 千葉工業大学教授 工学部 建築都市環境学科
(〒275-8588 千葉県習志野市津田沼2-17-1)

⁵フェロー会員 工博 早稲田大学理工学術院教授 創造理工学部
(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

シールド工法が都市部のトンネル工事に用いられるようになってから既に数十年が経過し、シールドトンネルの長期間の供用において、トンネルには様々な要因によりひび割れ等の変状が生じていることが報告されるようになった。本研究は、シールドトンネルに圧密による荷重の増加が発生した場合の土圧の変化を、有限要素法を用いた数値解析により明らかにし、圧密沈下に起因したシールドトンネルの変形およびひび割れの発生メカニズム解明のための基礎的なデータを得ることを目的とする。軟弱な粘性土地盤中に建設されたシールドトンネルを数値解析の対象として、供用後に計測されたトンネル変位の発生要因である圧密に伴うトンネル作用土圧の変化量および土圧分布を求めた。

Key Words : shield tunnel, soft clayey ground, long term deformation, finite element analysis

1. はじめに

シールド工法が都市部のトンネル工事に用いられるようになってから、既に数十年が経過し、近年では既設のシールドトンネルを長期にわたり供用するためのメンテナンス技術の開発が、重要な工学的課題となってきている。長期間の供用において、シールドトンネルには様々な要因によりひび割れ等の変状が生じることが報告されており、とくに軟弱な粘性土地盤中に建設されたシールドトンネルでは、建設から十数年程度経過して内空の変形やセグメントのひび割れといった変状が発生していることが報告されている^{1)~4)}。

シールドトンネルの長期的な変状についての研究、報告事例のうち、トンネルに作用する荷重を長期にわたり計測した事例については、硬質地盤では建設後10年以上の長期計測の事例^{5),6)}がある。しかし、軟弱な粘性土地盤ではこのような事例は少なく、計測期間が3~4年程度についての報告事例⁷⁾があるものの、長期の作用土圧変化については言及されてい

ない。

トンネルに作用する荷重の長期的な変動については、旧国鉄の技術指針⁸⁾にトンネルと地盤の剛性の違いによる鉛直付加荷重について設計上の扱い方が示されている。これは、埋設管に作用する鉛直荷重算定の基礎理論とされるMarston⁹⁾、Spangler¹⁰⁾の方法に基づき鉛直荷重を定めたものである。小山ら¹¹⁾は有限要素法による有効応力解析に基づき、地盤沈下に伴う増加荷重の算定法を検討し提案している。齊藤ら¹¹⁾は建設から10年程度が経過し、内空の変形が生じているトンネルの内空変位量から、はりばねモデルで負荷荷重を推定し、覆工の定量的な安全性を評価している。

圧密沈下に起因する荷重を定量的に評価するため、赤木ら^{12),13)}は縮尺模型実験を行い、トンネル周辺地盤の変形状況と土圧の変化を経時的に調査し、トンネル周囲の排水条件の違いによるトンネル作用土圧の経時変化を示した。有泉ら²⁾は地下水位の変動によるほか、トンネル自体からの排水においても長期的な荷重変動が発生し得ることを遠心模型実験か

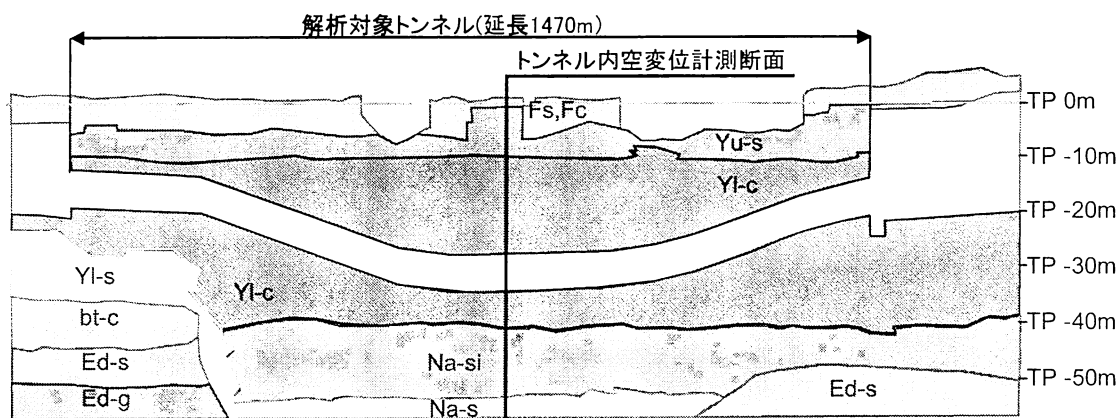


図-1 対象トンネル土質縦断面図

ら確認し、トンネルの存在により地盤の変形が抑制され地盤内応力が再配分されることで長期荷重変化が発生していることを報告している。また、その実験結果について土水連成解析によるフィッティングで妥当性を確認し、各種条件に関するパラメータスタディによりトンネルに作用する長期荷重の影響度合いを考察している¹⁴⁾。

本研究は、シールドトンネルに圧密による荷重の増加が発生した場合のトンネルに作用する土圧の変化を、有限要素法を用いた数値解析により明らかにし、圧密沈下に起因したシールドトンネルの変形およびびび割れの発生メカニズム解明のための基礎的なデータを得ることを目的とする。本論文では、軟弱な粘性土地盤中に建設された鉄道シールドトンネルを数値解析の対象とした。

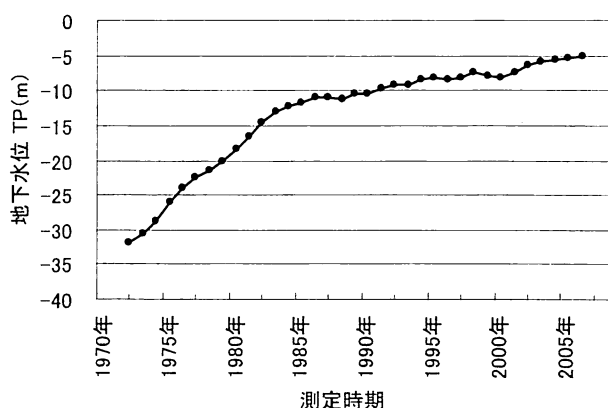


図-2 地下水位の経年変化

2. 対象トンネルの概況

(1) 土質およびシールドトンネル

対象としたシールドトンネルは、軟弱な粘性土が厚く堆積した地盤中に建設されている。土層構成は図-1に示すように、上部に埋土層と沖積砂質土層があり、その下に軟弱な沖積粘性土層が20～30mの層厚で堆積している。この沖積粘性土層は N 値が1～3程度で、一軸圧縮強度100～200kPa、自然含水比は51～63%とほぼ液性限界に等しい。シールドトンネルはこの沖積粘性土層に位置している。

トンネルは、泥水式シールド工法で施工され、セグメントリング外径が6 900mm、土被りは13.0～26.5m、シールド掘進の延長が約1.47kmで1985年に掘進を開始し1987年に竣工している。セグメントは主に高さ480mm、幅1mの中子形のRCセグメントが使用されている。

(2) 周辺の地下水位および地盤変位

対象としたトンネルから約3km離れた地点に設置されている観測井での地下水位（ストレーナ深さ：65～70m）と地層変動量の測定データを図-2、図-3

に示す^{15),16)}。

図-2は、1972年以降の地下水位の経年変化を示したものである。この地域の地下水位は、揚水によって1965年頃までは低下していたが、1972年に実施された水溶性天然ガスの採取停止等の諸規制によって1985年頃までに急激に上昇した。その後、現在までは緩やかな上昇を続けており、対象のトンネルが竣工した1987年から2006年までの間では約6m上昇している。

図-3は、1972年を基準とした地層の変動量の経年変化を示したものである。図中に示している地表面から鉄管底までの地層変動量とは、地表面から観測井の底までの70m間の地層（表層部）の変動量を示すものである。また、鉄管底から下位の地層の変動量とは、観測井の底から下位の地層（深層部）の変動量を示すものである。これによると、深層部地盤は隆起しており、これは地下水位の上昇に伴う有効応力の減少によるものと推測される。一方、表層部地盤は収縮（沈下）傾向にある。これは、かつての揚水に伴う広域的な圧密の残留沈下と推測されるが、当該地域の地層変動は、深さにより挙動が異なる複雑な状況を示している。1987年から2006年までの変動量は、表層部が4.8cmの沈下、深層部が7.6cmの隆

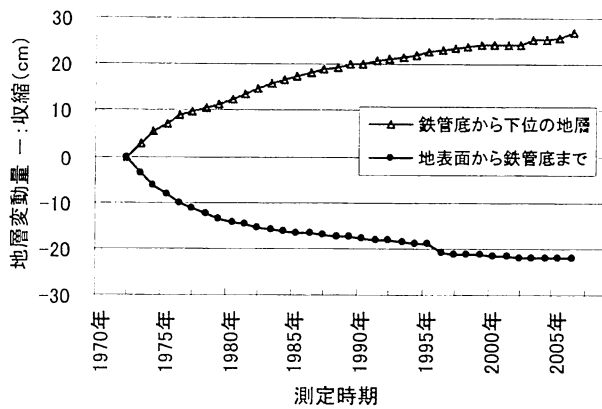


図-3 地層の変動量

起である。対象トンネルの最大土被りが27m程度であることから、本トンネルは建設後に表層部地盤の圧密沈下と深層部地盤の隆起押し上げによる荷重増加の影響を受けたものと推測される。

(3) トンネル内空変位計測

対象としたトンネルでは、竣工後の1987年12月から定期的な内空変位量の計測が行われている。その結果、トンネルは図-4に示すように鉛直方向に縮小し、水平方向に拡大する横つぶれ傾向にあることがわかった。

このうち、図-1中の内空変位計測位置における、クラウン-インバート間の鉛直内空変位とスプリングラインの水平内空変位の計測結果を図-5に示す。この計測断面での土被りは26.4mで、ほぼトンネルの最深部であり、トンネルの縦断勾配はほぼ水平である。なお、この図ではトンネルの内空が拡大する方向への変位を+、縮小する方向への変位を-で示している。

この図から、この計測断面では1987年の計測開始直後から約3年の間に鉛直方向に-3.1mm、水平方向に+3.1mmと1mm/年程度の内空変位が進行していることがわかる。しかし、時間経過とともに変位の進行は緩やかになっており、1997年頃にはほぼ安定し、最大変位量は鉛直方向で-7.1mm、水平方向で5.5mmであった。

3. 三次元土水連成有限要素法解析によるトンネル作用土圧の推定

2.で述べたとおり、トンネル供用後に発生したトンネルの変形は、表層部地盤の圧密沈下や深層部地盤の隆起押し上げによる荷重の増加に起因しているものと考えられる。そこで、三次元土水連成有限要素法解析^{17),18)}を用いて荷重の増加およびこれに伴うトンネルの変形を数値解析し、計測結果と数値解析結果の比較によってトンネル作用土圧の経時変化を推定した。

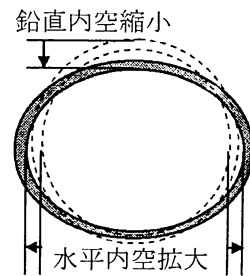


図-4 トンネルの変形モード

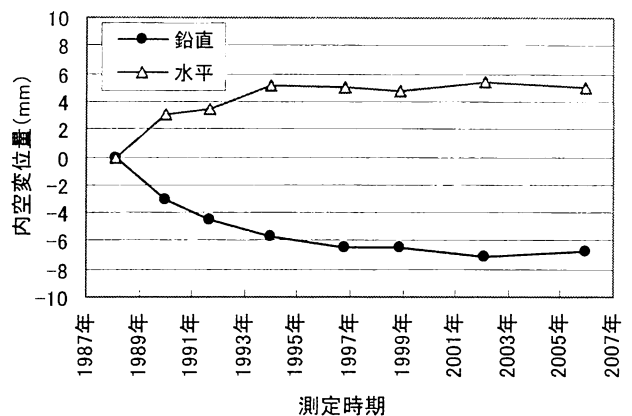


図-5 トンネル内空経年変化

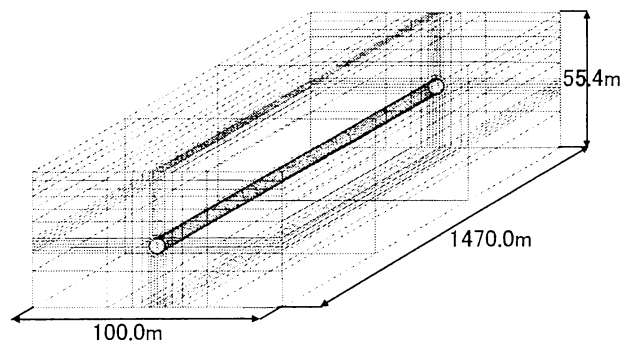


図-6 解析モデル

(1) 解析の概要

図-6は解析に用いた有限要素法解析モデルの概観である。解析モデルの深さ方向の土質分布は図-1を参考に図-7のようにした。

解析モデルの変位境界条件は、図-8に示すように解析モデルの底面では鉛直方向の節点変位を固定とし、側面では水平方向を固定とした。また、トンネルは両端の立坑部で固定とした。

排水境界条件は、地表面と底面を排水、側面とトンネル周囲を非排水とした。

なお、ここで荷重の増加は、地表面に等分布の鉛直荷重を載荷することで再現させることとした。この鉛直荷重の値は、2.で述べたトンネル内空変位のうち、経年10年における鉛直方向の計測値と解析値が近い値となるように試行を繰り返して決定したものである。

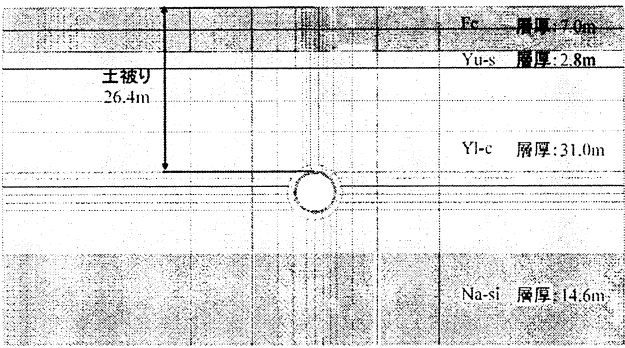
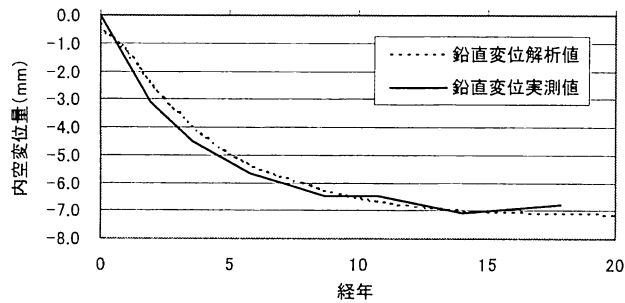


図-7 土質分布

表-1 地盤の入力パラメータ

項目 \ 地層	Fc	Yu-s	Yl-c	Na-si
弾性係数 (kPa)	2,500	25,250	4,498	38,300
湿潤密度 (g/cm ³)	1.73	1.84	1.63	1.83
ポアソン比	0.35	0.35	0.27	0.43
透水係数 (m/s)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-3}	8.0×10^{-7}	2.0×10^{-6}



(a) 鉛直方向

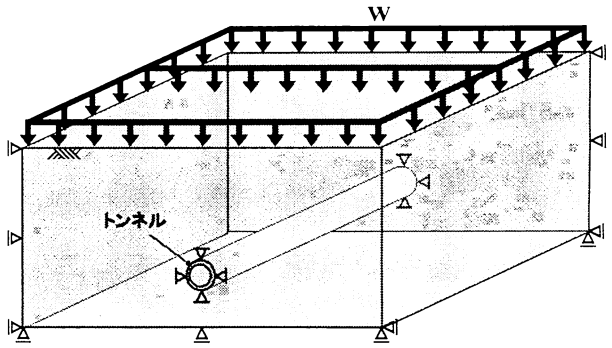
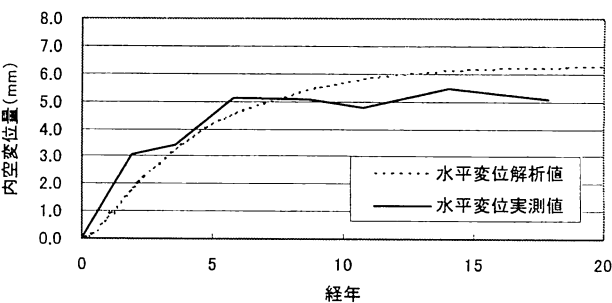


図-8 トンネルの変位境界条件
および荷重図

表-2 トンネルの入力パラメータ

トンネル外径 (m)	6.90
セグメント高さ (m)	0.48
トンネル横断方向弾性係数 (kPa)	3.59×10^7
トンネル縦断方向弾性係数 (kPa)	7.44×10^6
密度 (g/cm ³)	2.70
ポアソン比	0.17



(b) 水平方向

図-9 内空変位の計測値と解析値の比較

(2) 入力パラメータ

a) 土質パラメータ

土質パラメータは、対象トンネルの近傍で実施された土質調査結果をもとに設定した。この土質調査では標準貫入試験および各種の室内土質試験が実施されている。解析に用いた地盤の入力パラメータを表-1に示す。

b) トンネル剛性

有限要素法解析モデルでは、トンネルはセグメントの継手の影響を考慮できない剛性一様モデルである。このため、トンネルの剛性によって継手の影響を考慮することとした。

トンネル横断方向については、2リング梁ばねモデルを用いて、継手の回転ばね定数を考慮したケースとこれを無限大にした剛性一様リングのケースで変形量が同じとなるように剛性一様リングの弾性係数を決めた。

トンネル縦断方向は、トンネル軸方向の等価曲げ剛性を算出¹⁹⁾し、これとセグメントリングの断面二次モーメントから換算弾性係数を求めた。解析に用いたトンネルの入力パラメータを表-2に示す。

(3) 解析結果

a) 内空変位

図-9は、この計測断面における鉛直方向および水平方向のトンネル内空変位の計測値と解析値を比較したものである。鉛直方向の内空経年変位量の計測値と解析値が概ね合致している。また、水平方向の内空経年変位量についてもほぼ合致していることがわかる。このとき、地表面に作用させた鉛直荷重の大きさは250kPaであった。

図-10は、セグメントリングの変形状況を経時的に示したものである。トンネルは鉛直荷重の増加に伴い横つぶれに変形している。

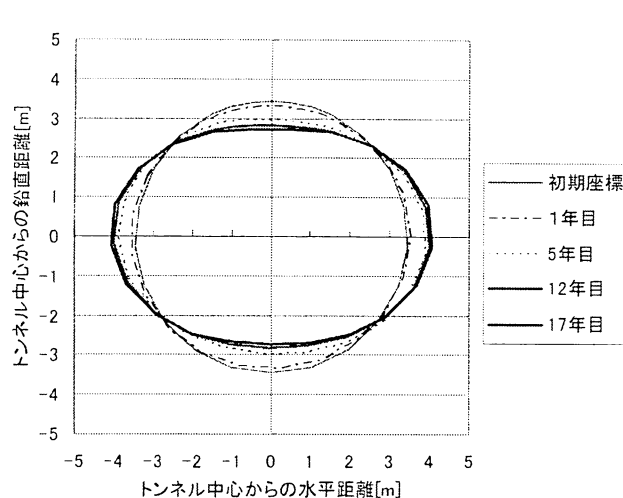


図-10 トンネル変位の経時変化
(変位量 200 倍表示)

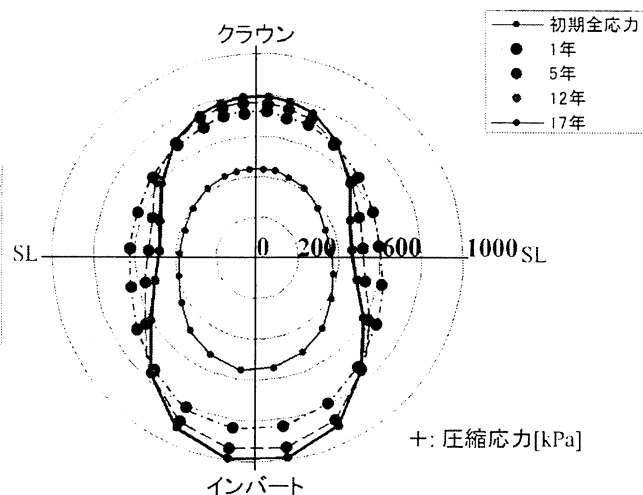


図-11 トンネル作用土圧分布の経時変化

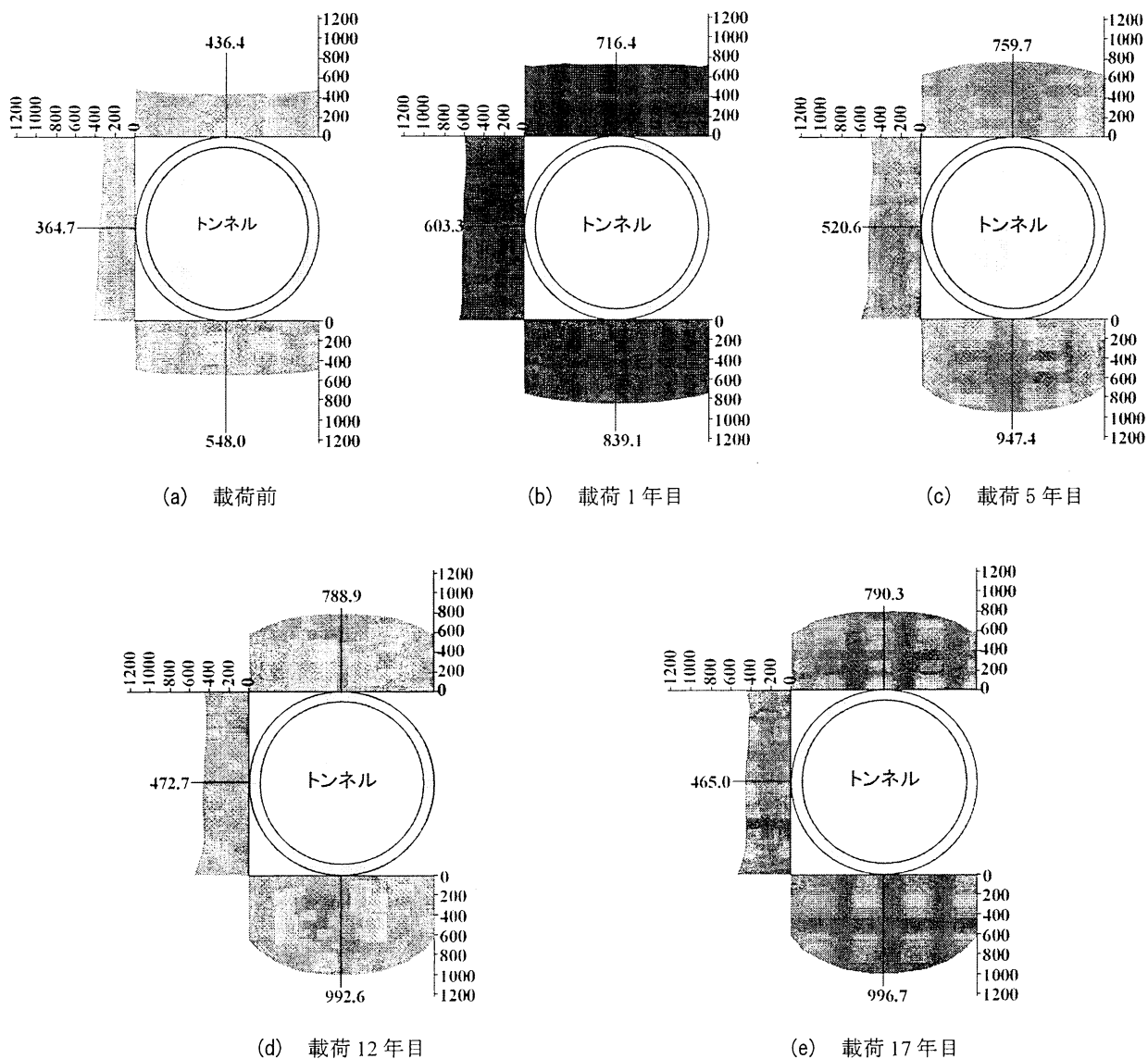


図-12 鉛直土圧，側方土圧の分布

これより、この解析手法が軟弱粘性土地盤における荷重の増加によるシールドトンネルの長期的な変形挙動を再現できる可能性があることを確認した。

b) 作用土圧

図-11は、セグメントリング外周に作用する半径方向の土圧分布の経時変化を示したものである。この図から、荷重の増加に伴いトンネルに作用する土圧が、クラウン、インバート付近では増加し、スプリングライン付近では減少する傾向にあることがわかる。土圧の減少は、載荷した荷重が解析初期では、トンネルに過剰間隙水圧として全方向に均等に作用していたが、時間経過とともに均等に作用していた過剰間隙水圧が消散していくことによるものと考えられる。

通常、土圧は鉛直土圧と側方土圧に分けて設計されることから、図-11の土圧を鉛直成分と水平成分に分解した土圧分布図を図-12に示す。鉛直土圧の増加量はトンネルインバート部で最も大きく、載荷1年目に対して5年目で約13%、12年目では約18%、17年目では約19%増加している。スプリングラインでの側方土圧の減少量は、載荷1年目に対して5年目で約14%、12年目では約22%、17年目では約23%減少している。トンネルインバート部で鉛直土圧の増加量が最も大きくなっているのは、トンネル長を非常に長くしているためにトンネルと地盤が一体となって沈下していることによると考えられる。

載荷12年目と17年目の土圧分布を比較すると、鉛直土圧の増加が最も大きいインバート部で、載荷12年目に対する17年目の増加量が0.4%程度、土圧が減少しているスプリングラインで側方土圧の減少量が1.6%程度であることが確認できた。この時点では、内空変位量の計測値もほぼ安定していることから、現時点においては、圧密沈下が進行し、トンネルを変形させるような土圧の変化はほとんどなくなっており、今後、これ以上の変形が発生する可能性は低いものと思われる。

4. まとめ

圧密による荷重の増加に起因したシールドトンネルの変形およびひび割れの発生メカニズム解明のために必要なトンネルに作用する土圧の変化量を有限要素法を用いた数値解析により求めた。そして、この解析手法が軟弱粘性土地盤における荷重の増加によるシールドトンネルの長期的な変形挙動を再現できる可能性があることが確認できた。

荷重の増加に伴いトンネルに作用する土圧は、クラウン、インバート付近では増加し、スプリングライン付近では減少傾向を示すことと土圧の増加量はトンネルインバート部で最も大きくなることがわかった。

今後、本研究の成果を用いてセグメントのひび割れ再現解析を行い、ひび割れ発生時期の特定やひび割れ発生メカニズムの解明につなげたいと考えてい

る。

参考文献

- 1) 斉藤正幸, 古田勝, 山本稔: 沖積層地盤に構築したシールドトンネルの変形に関する考察, トンネル工学研究発表会論文・報告集第4巻, pp55-62, 1994.
- 2) 有泉毅, 五十嵐寛昌, 金子俊輔, 永谷英基, 山崎剛, 日下部治: 周辺地盤の圧密沈下に伴う既設シールドトンネル作用荷重の変化メカニズム, 土木学会論文集No.750/III-65, pp115-134, 2003.
- 3) 津野究, 三浦孝智, 石川幸宏, 山本努, 河畑充弘: 内空断面測定および変状展開図より把握したシールドトンネルの変形傾向, トンネル工学報告集第17巻, pp.257-261, 2007.
- 4) JTA保守管理委員会: 連載講座 建設・保守管理へのフィードバック(3), トンネルと地下, 第29巻7号, pp75-84, 1998.
- 5) 清水満, 中根理, 新堀敏彦, 加藤教吉: 供用開始後の鉄道用シールドトンネルにおけるセグメント測定(2), 第32回地盤工学研究発表会, pp2039-2040, 1997.
- 6) 加藤精亮, 清水満, 桑原靖, 新井孝弘, 団昭博: MFシールドセグメントの長期現場計測, 土木学会第56回年次学術講演会概要集VI-049, pp230-231, 2001.
- 7) 真下英人, 石村利明, 酒寄建之: 粘性土地盤中のシールドトンネルの作用土圧に関する研究, トンネル工学研究論文・報告集第6巻, pp333-338, 1996.
- 8) 財団法人日本鉄道施設協会: シールドトンネルの設計施工指針(案), pp97-99, 1983.
- 9) Marston, A. and A.O.: The theory of loads on pipe in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe, Bulletin 31 Iowa Eng. Experiment Station, 1913.
- 10) Spangler, M.G.: Underground conduits - An appraisal of modern research, Transactions of ASCE, Paper No.2337, Vol.113, pp316-374, 1948.
- 11) 小山幸則, 米島賢二, 松本吉雄, 新井泰: 自然地盤沈下に伴うトンネルへの増加荷重の検討, 第29回土質工学研究発表会, pp1995-1996, 1994.
- 12) 赤木寛一, 小宮一仁: 軟弱粘性土地盤の沈下に伴うトンネル周面土圧の変化について, 第25回土質工学研究発表会, pp1747-1750, 1990.
- 13) 赤木寛一, 小宮一仁, 尾浦猛人: 粘土地盤の圧密沈下に起因するトンネル土圧の作用機構について, 第29回土質工学研究発表会, pp1993-1994, 1994.
- 14) 有泉毅, 金子俊輔, 塩治幸男, 山崎剛, 日下部治: 軟弱粘性土地盤の圧密に伴うシールドトンネルの長期荷重に関する解析的研究, 土木学会論文集No.799/III-72, pp89-108, 2005.
- 15) 東京都土木技術研究所: 東京都土木技術研究所年報, 1972~2005
- 16) 東京都土木技術センター: 土木技術センター年報, 2006~2007
- 17) Christian, J.T.・Boehmer, J.W.: Plane strain consolidation by finite elements, Proc. ASCE, Vol.94, SM4, pp.1435~1457, 1970.
- 18) 小宮一仁: シールド工事に伴う軟弱粘性土地盤の力学挙動に関する解析的研究, 早稲田大学博士論文, 第2章, 1994.
- 19) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説シールドトンネル, pp161~162, 2002.

LONG TERM DEFORMATION AND ACTING EARTH PRESSURE OF A TUNNEL DUE TO CONSOLIDATION SETTLEMENT OF SOFT CLAYEY GROUND

Shinji YAKITA, Kiwamu TSUNO, Hiroki TAKAHASHI, Kazuhito KOMIYA
and Hirokazu AKAGI

The long term deformation of a tunnel of 6.9 m diameter and 1470 m long was measured in the field for more than eighteen years after the completion of tunnelling. The maximum vertical and horizontal distortions measured at the internal surface of the tunnel were approximately 7.1 mm and 5.5 mm respectively. The tunnel deformation was mainly caused by the earth pressure increase due to consolidation settlement of soft clayey soil around the tunnel. Three dimensional finite element analysis was performed to estimate the amount of the earth pressure increase during consolidation settlement of the ground, governing the long term deformation of the tunnel.